



# **Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia**

**Luz Angela Orozco Arquez**

Universidad del Norte  
Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias  
Barranquilla, Colombia  
2020



# **Análisis multianual del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia**

**Luz Angela Orozco Arquez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Pregrado en Geología**

Director (a):

PhD. Natalia Hoyos

Codirector (a):

PhD. Jaime Escobar

PhD. Alexander Correa-Metrio

Línea de Investigación:

Atmosfera, Sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias

Barranquilla, Colombia

2020



*A mi madre.*



## Resumen

El fenómeno de isla de calor cada vez afecta más personas a medida que las ciudades crecen debido al aumento de temperatura que se da dentro de las mismas. Bogotá, la ciudad de Colombia que más población concentra, no es ajena a este fenómeno que puede tener repercusiones en el consumo energético y la calidad del aire. Se realizó un estudio de caracterización de las islas de calor usando temperaturas reportadas por estaciones climáticas tanto dentro de la ciudad como en la zona rural que la rodea, al igual se implementó el uso de sensores remotos de los proyectos Landsat 7, Landsat 8 y MODIS Terra, para delimitar el polígono urbano y analizar las temperaturas superficiales de los sensores térmicos disponibles en estas misiones. Como resultado se obtuvo que la isla de calor superficial se extiende 2 kilómetros más allá del límite urbano. A partir de un análisis de disimilitudes se puede inferir que la isla de calor tiene una tendencia al crecimiento espacial en los últimos 20 años. Además, las temperaturas reportadas dentro de la ciudad son  $0.7^{\circ}\text{C}$  más elevadas que las temperaturas rurales, el mes y la hora con mayor intensidad de isla de calor es enero y 13:00, respectivamente. Indicadores como NDVI y NDBI no son buenos estimadores de la temperatura atmosférica.

**Palabras clave:** Isla de calor, temperatura superficial, rural, urbano, temperatura atmosférica.

## Abstract

The heat island phenomenon is affecting more and more people as cities grow due to the increase in temperature within them. Bogotá, Colombia's most populous city, is no stranger to this phenomenon, which can have an impact on energy consumption and air quality. A study was carried out to characterize the heat islands using temperatures reported by climate stations both within the city and in the surrounding rural area. The use of remote sensors from the Landsat 7, Landsat 8 and MODIS Terra projects was also implemented to delimit the urban area and analyze the surface temperatures of the thermal sensors available in these missions. As result, the surface heat island extends 2 kilometers beyond the urban boundary. From an analysis of dissimilarities it can be inferred that the heat island has a tendency to spatial growth in the last 20 years. Besides, the temperatures reported inside the city are 0.7°C higher than the rural temperatures, the month and the hour with greater intensity of heat island are January and 13:00, respectively. Indicators such as NDVI and NDBI are not good estimators of atmospheric temperature.

**Keywords:** Heat island, surface temperature, rural, urban, atmospheric temperature



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>1. Planteamiento del Problema.....</b>	<b>17</b>
1.1 Causas .....	17
1.2 Efectos .....	19
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>22</b>
2.1 Objetivo general.....	22
2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>3. Zona de Estudio .....</b>	<b>23</b>
<b>4. Metodología .....</b>	<b>25</b>
4.1 Variación de la temperatura de la superficie entre las zonas urbanas y rurales 25	
4.2 Patrones temporales y espaciales de la temperatura horaria .....	28
4.3 Influencia de variables de entorno sobre la temperatura promedio diaria .....	29
<b>5. Resultados.....</b>	<b>32</b>
5.1 Variación de la temperatura de la superficie entre las zonas urbana y rural...32	
5.2 Patrones horarios de las estaciones climáticas.....	37
5.3 Influencia de variables de entorno sobre la temperatura promedio diaria .....	39
<b>6. Discusiones .....</b>	<b>41</b>
<b>7. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>43</b>
7.1 Conclusiones .....	43
7.2 Recomendaciones .....	43
<b>A. Anexo: Bases de datos de estaciones climáticas.....</b>	<b>45</b>
<b>B. Anexo: Bases de datos de imágenes satelitales.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>49</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Vista en corte de distribución de temperaturas en las ciudades y zonas periféricas. ....	13
Figura 1-1. Hipótesis propuestas para tipos de transición de temperatura entre el área urbana y la periferia rural. ....	21
Figura 3-1. Ubicación de zona de estudio y estaciones climáticas. ....	24
Figura 4-1. Esquema de sectorización de anillos para análisis de variación de la temperatura superficial entre las zonas urbanas y rural. ....	27
Figura 5-1. Temperaturas superficiales obtenidas del satélite MODIS para los años 2002, 2008, 2014 y 2020. El límite está definido por imágenes Landsat del 2001, 2010 y 2018 respectivamente. ....	33
Figura 5-2. Distribución de temperaturas para las fechas con menor y mayor temperatura promedio respectivamente. ....	34
Figura 5-3. Gráficas de densidad para las áreas de influencia o anillos para los años 2002, 2008, 2014 y 2020. ....	34
Figura 5-4. Medianas de temperaturas en cada sector para todos los años analizados. ....	35
Figura 5-5. Índices de disimilitud entre anillos para todos los años analizados. ....	36
Figura 5-6. Evolución temporal de índice de disimilitud. ....	36
Figura 5-7. Superficies de temperaturas horarias para la ciudad de Bogotá. ....	38

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1. Urban Heat Island Index para ciudades de Latinoamérica.....	20
Tabla 4-2. Índices obtenidos de imágenes Landsat.....	30
Tabla 5-1. RMS para las superficies horarias creadas a partir de co-kriging para la ciudad de Bogotá.....	39
Tabla 5-2. UHII promedios horarios para la ciudad de Bogotá.....	39
Tabla 5-3. UHII promedios mensuales para la ciudad de Bogotá. ....	39
Tabla 5-4. Coeficientes y respectiva significancia en ajuste de mínimos cuadrados ordinarios. ....	40

## Lista de Símbolos y abreviaturas

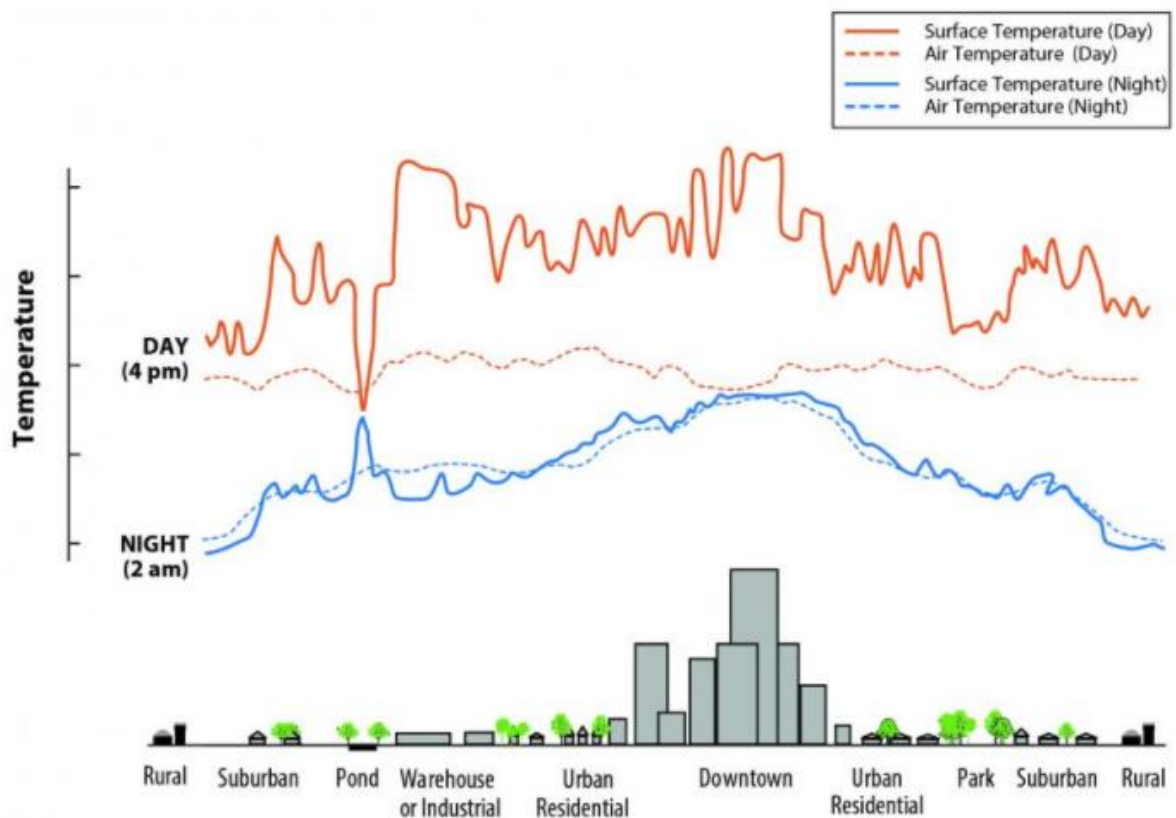
Abreviatura	Término
-------------	---------

CARC	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EPA	Environmental Protection Agency
EVI	Enhanced Vegetation Index
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IDW	Inverse Distance Weighted
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
PIB	Producto interno bruto
NDBI	Normalized Difference Building Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
RDM	Red de Monitoreo de Calidad de Aire – Secretaría de Ambiente Bogotá
RMS	Root Mean Square
SUHII	Surface Urban Heat Island Intensity
UHII	Urban Heat Island Intensity
TES	Temperature Emissivity Separation
WVS	Water Vapor Scaling

## Introducción

Las islas de calor son fenómenos que ocurren cuando zonas urbanas experimentan temperaturas superiores a las zonas de la periferia (Mccartney & Mehta, 2020). Desde el 2007, la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) de Estados Unidos (Voogt, 2009) considera estos eventos dentro de su catálogo de fenómenos a monitorear. La intensificación de estas islas de calor está asociada a las propiedades térmicas de los materiales impermeables característicos de la urbanización y tiene efectos sobre el consumo de energía y la salud de la población que vive en la ciudad.

Figura 1. Vista en corte de distribución de temperaturas en las ciudades y zonas periféricas. Fuente: EPA



La Figura 1 muestra el comportamiento de las islas de calor sobre una zona urbana durante el día y la noche. De forma general la temperatura superficial es mayor en las zonas urbanas que en las zonas rurales tanto en horas del día como en horas de la noche. Algunos cuerpos como arroyos o superficies verdes actúan como termostatos, mientras

que sectores industriales o densamente contruidos están relacionados con temperaturas más altas durante el día. Adicionalmente existe una diferencia entre el efecto de isla de calor superficial y el efecto de isla de calor atmosférica (Mccartney & Mehta, 2020). La primera hace referencia a las temperaturas que se reportan sobre las superficies, ya sean urbanas o rurales, mientras que las islas de calor atmosféricas hacen referencias a las diferencias de temperaturas de la columna de aire de las zonas rurales o urbanas. La extensión de la columna de aire a la que es medida la temperatura permite hacer dos subdivisiones: islas de calor atmosféricas de cubiertas (hasta la cubierta o copa de la capa vegetal) o islas de calor atmosféricas de límite (hasta 1.5 kilómetros por encima de la urbanización).

Este problema ha sido abordado desde diferentes perspectivas. Desde el monitoreo, es uno de los fenómenos más estudiados dentro de la temática de cambio climático, ya que involucra grandes poblaciones con disponibilidad de datos (Memon, et al., 2008). Desde la perspectiva de prevención los avances apuntan diversas medidas tales como la implementación de materiales que tengan mejor comportamiento térmico, e. g. cubiertas y fachadas verdes (Memon et al., 2008), concreto y asfalto permeable para las vías (Carpio, et al., 2020), o al diseño de distribuciones urbanas que permitan una circulación más eficiente de las ondas de calor (Algretawee, et al., 2019).

La disponibilidad de imágenes satelitales ha permitido la realización de un gran número de estudios en este tema (Memon, et al., 2008). No obstante, el uso de dichos datos requiere calibración. Además, se debe tener en consideración la escala en la cual se analiza el fenómeno (Voogt, 2009). Por ejemplo, Neila (2000) realiza un análisis a microescala que estima el entrapamiento y absorción de radiación solar y superficies aislantes. Particularmente el tema de superficies aislantes está ampliamente abordado desde análisis de implementación de fachadas y cubiertas verdes, que han demostrado mejorar el confort de la población (Memon, et al., 2008). A nivel de mesoescala, los estudios se enfocan sobre temas de urbanismo, e.g. la forma y distribución de puntos calientes y puntos fríos (Farina, 2012). Los estudios macroescala de este fenómeno son cada vez más comunes gracias al incremento en la potencia computacional que permite administrar grandes bases de datos geográficos que integran imágenes satelitales, información demográfica y catastral entre otros, como fue el caso de Firozjaei et al., (2020) y Yao et

al., (2017). Estos estudios a macroescala tratan temas como la intensidad de la isla de calor y su efecto en las zonas rurales aledañas a las ciudades.

Actualmente se trabaja en cuantificar la intensificación de las islas de calor, ya no sólo basándose en las anomalías de temperaturas, sino desarrollando índices que puedan aplicarse tanto en zonas urbanas como en las zonas rurales que las rodean, con el fin de obtener una caracterización de la interacción térmica de la zona urbana y rural, y garantizar mejores formas de intervención. Particularmente en el estudio de Beijing, Wang, Zhou, & Wang, (2019) usaron las diferencias entre las temperaturas reportadas por las zonas rurales y las reportadas por las zonas urbanas para generar el índice SUHI (Surface Urban Heat Island Intensity), usando series de tiempo para temperatura superficial terrestre (LST), EVI y NDBI. Estos autores encontraron una intensificación de las islas de calor asociada a un enfriamiento de las zonas rurales y crecimiento espacial de los puntos calientes en esa ciudad. En Guwahati-India (Chetia, et al., 2020), se realizó un estudio similar en donde analizaron la correlación existente entre LST y NDBI para ese sector con imágenes Landsat, encontrando correlaciones positivas entre las dos variables. En Canada (Gaur, et al., 2018) fueron analizadas LST de 20 ciudades con los datos reportados por MODIS desde 2002 hasta 2012, encontrando que 16 ciudades presentaron tendencias positivas de SUHI (Superficial Urban Heat Island) y 4 de ellas con tendencias negativas. Este comportamiento puede estar asociado a ciudades altamente vegetadas y con altas elevaciones.

Recientemente se ha estudiado la posibilidad de estudiar las islas de calor superficiales a través de sensores remotos que no se encuentran ubicados satelitalmente, sino que funcionan desde la superficie terrestre (Shandas et al, 2019). Este estudio ha permitido calibrar los resultados de LST satelitales para Baltimore, Maryland, Richmond y Virginia, encontrando sobrestimación en las temperaturas superficiales de zonas densamente urbanizadas, y subestimación en zonas densamente vegetadas por parte de los resultados satelitales. Dentro de las desventajas de este método se encuentra la baja cobertura espacial y la planificación con amplios equipos de personas monitoreando el fenómeno al mismo tiempo.

Sin embargo, se debe reconocer que aún existe un rezago de las ciudades latinoamericanas en el monitoreo de las islas de calor, a pesar de concentrar gran cantidad de población (Henríquez & Romero, 2019). Específicamente, limitaciones relacionadas con

la calibración y número de estaciones, impiden realizar triangulaciones o estimaciones estadísticamente significativas. En tales casos, los datos satelitales pueden ser usados para aumentar la cobertura temporal y espacial de los registros mencionados.

La presente tesis es un análisis macroescala de la evolución temporal del fenómeno de islas de calor en la ciudad de Bogotá, que utiliza información de los satélites MODIS Terra, Landsat 7 y Landsat 8, y registros históricos de temperaturas de estaciones climáticas ubicadas en diferentes puntos de la ciudad, por lo que representa un estudio tanto de las islas de calor atmosféricas de cubierta como superficiales. La pregunta de investigación que busca resolver esta tesis está asociada a la existencia, tamaño espacial e intensidad de la isla de calor en la ciudad de Bogotá. En las siguientes secciones se presentan (1) planteamiento del problema donde se presentan las preguntas de investigación y se incluyen los avances teóricos sobre la definición del fenómeno y los estudios previos en la ciudad de Bogotá, (2) La metodología se podrá observar los datos y análisis realizados y (3) los resultados y discusión



# 1. Planteamiento del Problema

El crecimiento acelerado de las ciudades es un fenómeno global y está ligado a diferentes factores socioeconómicos como la industrialización, búsqueda de movilidad social, conflicto armado o incluso factores ambientales como sequías e inviernos intensos que obligan a la población rural a desplazarse a grandes centros poblados (Henríquez & Romero, 2019).

La capital de Colombia, Santafé de Bogotá (referida como Bogotá en el resto del texto), no es ajena a este fenómeno. Desde el 2005 hasta el 2018, en los censos realizados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), su número de habitantes ha aumentado en 280.000 aproximadamente, sin incluir los municipios que conforman el área metropolitana como Soacha, Madrid, Mosquera y Chía. Naturalmente, las actividades comerciales e industriales han aumentado para suplir la creciente demanda de empleo, productos y vivienda, con el consecuente aumento de áreas impermeables. Por ejemplo, el informe de Bogotá Cómo Vamos (2020), el cual indica un aumento de ~500.000 en el número de viviendas entre el 2005 y el 2018.

A continuación, se introducen las principales causas y efectos de las islas de calor para luego abordar el contexto local de la ciudad de Bogotá.

## 1.1 Causas

Según EPA (2008) existen 4 razones principales a las que se les atribuye el fenómeno de islas de calor:

- Reducción de vegetación en zonas urbanas: Al perder la cobertura vegetal, se limitan los procesos de evapotranspiración desarrollados por las plantas, que permiten la liberación de agua a la atmósfera, que a su vez regula la temperatura del ambiente.
- Propiedades de materiales: La energía proveniente de la radiación solar puede ser reflejada o absorbida, y estas propiedades dependen estrictamente de los

materiales que constituyen la superficie sobre la que recae la radiación solar. Para las zonas urbanas, las superficies están dominadas por asfalto, concreto y ladrillos, cuya respuesta a la radiación solar es significativamente distinta a otras superficies como agua o zonas vegetadas. La reflectancia solar, o albedo, representa el porcentaje de energía solar reflejada por la superficie, y en el caso de materiales oscuros, esta energía reflejada se reduce, aumentando la cantidad de energía absorbida por el material, por lo que superficies oscuras como el asfalto y concreto reflejan muy poca de la energía en comparación con superficies como cobertura de nieve o vegetación (McPherson, 1990). Además de la incapacidad de reflejar la energía, algunos materiales típicos de las zonas urbanas tienden a perder calor de manera más lenta (materiales cerámicos como concreto y ladrillos) (Pasetto, Pasquini, Giacomello, & Baliello, 2019), por lo que el descenso de temperatura durante la noche puede tardar más tiempo que en las superficies vegetadas.

- Geometría urbana: La geometría de la ciudad, como altura de las edificaciones, separación entre construcciones, distribuciones de espacios verdes, entre otros, pueden afectar patrones de distribución de vientos y absorción de energía generando encañonamientos de corrientes de calor que hacen que la distribución de temperatura en la ciudad no sea uniforme (McPherson, 1990, Hsieh & Huang, 2016).
- Aportes de calor antropogénicos: los aportes de calor antropogénicos provienen en su mayoría de las actividades económicas que se desarrollan dentro de las urbes, muchas de ellas asociadas a la industria, como metalurgia, procesamiento de hidrocarburos, transporte masivo, entre otros (Ogashawara & Bastos, 2012; Feng et al., 2019).
- Clima: Zonas con mayor exposición a la radiación solar, como aquellas donde predominan la baja nubosidad y vientos calmados, influyen en los patrones de circulación de la energía dentro de la ciudad, por lo que cada ciudad es un sistema diferente, incluso las islas de calor se comportan de forma diferente entre estaciones (Feng et al., 2019; Henríquez & Romero, 2019).
- Ubicación geográfica: Finalmente, algunas características como altura respecto al nivel del mar, cercanía a costas o grandes cuerpos de agua, influyen en los patrones de temperatura de la ciudad (Henríquez & Romero, 2019).

## 1.2 Efectos

En el mismo documento de EPA (Reducing Urban Heat Islands – Compendium of Strategies, 2008) se habla de los efectos directos e indirectos que tienen las islas de calor, dentro de los que se destacan los siguientes:

- Aumento del consumo de energía para refrigeración, fenómeno que ocurre y preocupa a las entidades gubernamentales porque aumenta considerablemente la demanda de energía destinada a la estabilización de la temperatura durante el día. Por lo que ya no sólo deben preocuparse por las altas cantidades de energía que consume una gran ciudad, sino por los altos niveles de energía que consume una gran ciudad más caliente durante el día (Renard, Alonso, Fitts, Hadjiosif, & Comby, 2019).
- El aumento de consumo de energía se convierte en un detonador de emisión de gases de efecto invernadero por el consumo de combustibles fósiles para suplir las necesidades energéticas generadas, convirtiéndose en un ciclo que se alimenta a sí mismo, porque estos gases favorecen el aumento de temperatura en ciertos sectores de la ciudad (Memon et al., 2008).
- La calidad de aire se ve disminuida y con ella el confort, en algunos casos generando/agudizando padecimientos asociados a enfermedades cardíacas y respiratorias (Heaviside, Macintyre, & Vardoulakis, 2017).
- Otro de los efectos documentados en menor medida, son las afectaciones a la calidad del agua causadas por la contaminación térmica de corrientes. Este tipo de eventos es particularmente notable cuando se presentan escorrentías sobre superficies en pavimentos o cubiertas, que aumentan la temperatura de cuerpos de agua cercanos (EPA, 2008). El equilibrio biológico de estos cuerpos de agua se puede afectar desestabilizando ciclos reproductivos y de metabolismo en especies acuáticas.

En resumen, las islas de calor constituyen un problema ambiental, energético y de salud pública que afecta tanto a los habitantes de las ciudades como de las periferias.

En 2019, Henríquez & Romero, realizaron una compilación de climas urbanos en Latinoamérica y analizaron los patrones morfológicos de cada ciudad (topografía,

cuerpos de agua, distribución de espacios, etc.) para determinar las variables que controlan la intensidad de la isla de calor (UHII), sus efectos en el consumo de energía, en la salud y en la calidad del aire. La Tabla 1-1 es un resumen de las características encontradas en los estudios recopilados para 7 de las 10 ciudades más pobladas de Latinoamérica. El índice de intensidad de isla de calor urbana (o UHII por sus siglas en inglés) mide la diferencia entre las temperaturas promedio de las zonas rurales respecto a las zonas urbanas.

Tabla 1-1. Urban Heat Island Index para ciudades de Latinoamérica. Fuente: Henríquez & Romero

Ciudad	UHII (°C)	Hora UHI (Hora local)	Estación de intensificación
Sao Paulo	8.0	16:00	Verano
Ciudad de México	8.0	06:00	Invierno
Buenos Aires	4.6	06:00	Invierno
Rio de Janeiro	5.0	06:00	Otoño
Lima	-	-	Verano
Santiago	4.8	00:00	Verano
Belo Horizonte	4.7	16:00	-
Bogotá	3	-	-

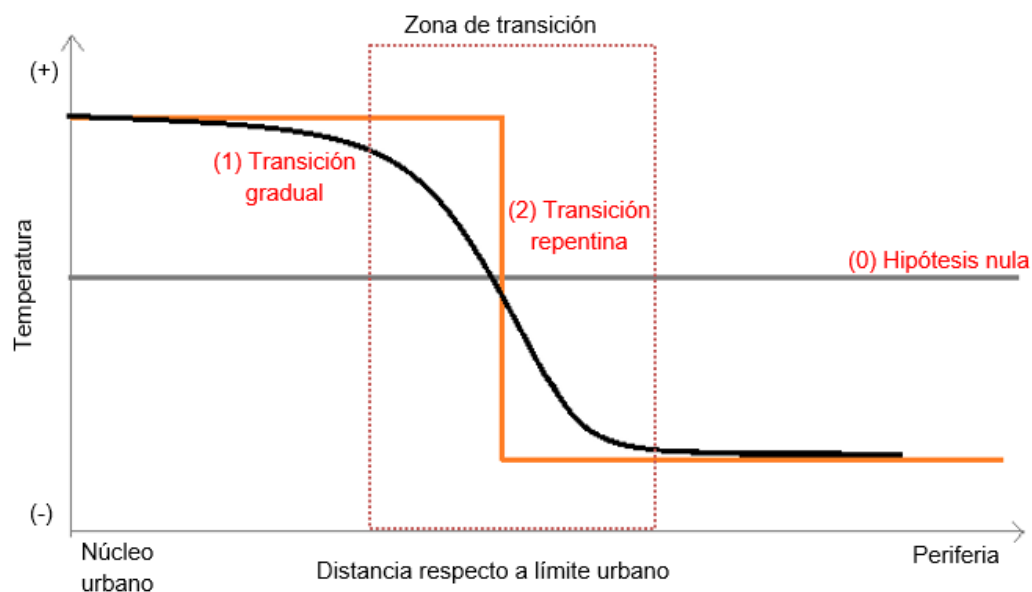
En el caso de Bogotá, estos eventos se han estudiado en cuatro ocasiones: Pabón et al., (1998) realizaron un análisis preliminar de la isla de calor en la Sabana de Bogotá con datos de las estaciones climáticas del IDEAM desde 1968 hasta 1998. En este estudio encontraron un aumento hacia el norte de la isoterma que cubre la ciudad a través del tiempo, manteniendo el núcleo de altas temperaturas casi estático en el centro de la urbe. En el año 2010, Ramirez & Dominguez actualizaron dicho estudio e incluyeron curvas de diferencias integrales y análisis de componentes principales, encontrando que la tendencia de aumento de temperatura se desplaza hacia el noroccidente, no hacia el norte como había estimado Pabón. Adicionalmente, registraron un aumento de temperatura urbana de 3°C por encima de la temperatura rural.

En 2013, Gómez & Castañeda , integraron el monitoreo de imágenes satelitales Landsat 7 con el software Erdas 9.3 para caracterizar la isla de calor presente en la ciudad. En ella encontraron que los núcleos de calor o *hotspots* se encuentran ubicados en localidades como Puente Aranda y Fontibón, y planearon lineamientos de gestión energético ambiental para la ciudad acordes al análisis temporal realizado. Moreno, Perdomo, & Avilés, (2018) incorporaron datos de cambio climático en un modelo neuronal de clasificación para predecir la temperatura mensual promedio de la ciudad, encontrando evidencias del calentamiento global.

Este estudio busca resolver la pregunta: ¿Cuál es la extensión y magnitud de la isla de calor de la ciudad de Bogotá? Como hipótesis nula se plantea que no existe tal fenómeno sobre la ciudad, mientras que la hipótesis alterna plantea que existe la isla de calor en la ciudad de Bogotá y su magnitud disminuye a medida que aumenta la distancia al perímetro urbano.

Adicionalmente, se espera que la disminución de este efecto se presente de forma (1) gradual o (2) repentina a medida que aumenta la distancia desde el límite urbano.

Figura 1-1. Hipótesis propuestas para tipos de transición de temperatura entre el área urbana y la periferia rural.



## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar la distribución, intensidad y comportamiento multianual de la isla de calor en la ciudad de Bogotá.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analizar la variación de la temperatura de la superficie entre la zona urbana y la periferia rural a partir de imágenes satelitales.
- Determinar y cuantificar la influencia de índice normalizado de urbanización (NDBI), elevación respecto al nivel del mar, cobertura de suelo y ubicación respecto a la urbe, sobre la temperatura registrada por las estaciones climáticas en la ciudad de Bogotá.
- Caracterizar patrones espaciales de temperatura a escala horaria a partir de mediciones de estaciones climáticas.

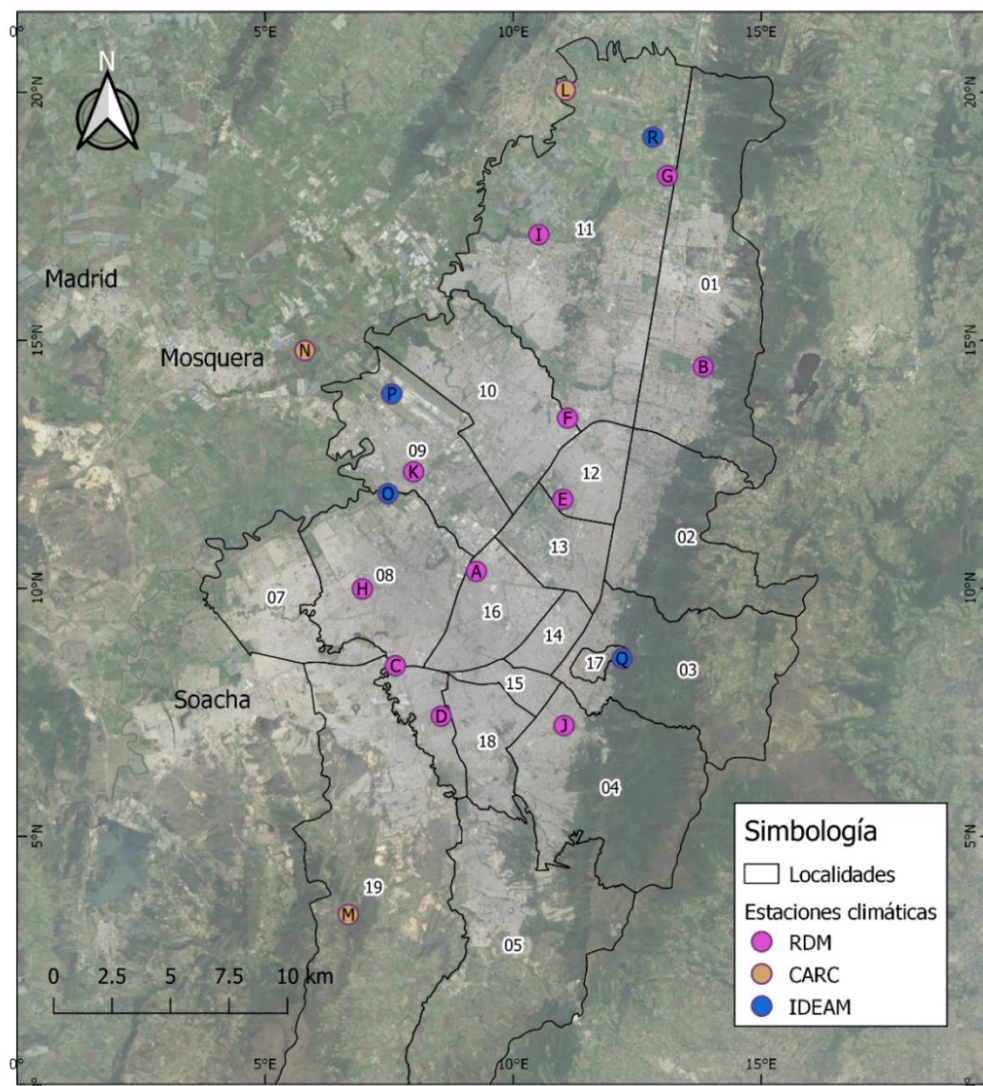
### 3.Zona de Estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada sobre la Sabana de Bogotá, la cual hace parte del Altiplano Cundiboyacense de la Cordillera Oriental de los Andes, como se observa en la Figura 3-1. Esta zona concentra un alto porcentaje de la actividad económica, representando 25.5% del PIB de Colombia (Cámara de Comercio, 2019), además de ser el centro de las actividades administrativas del país. Dentro de las características fisiográficas destacables, podemos observar que la ciudad está enmarcada al oriente por los cerros orientales y al occidente por el río Bogotá.

Según la caracterización climática realizada por IDEAM (1999), la media de temperaturas anuales oscila entre 12 y 15°C para el área urbana, mientras que en elevaciones asociadas a los cerros orientales se pueden alcanzar valores medios de 6°C. En general, los meses más cálidos del año son febrero, marzo, abril y mayo con variaciones que no superan 1°C con respecto a las temperaturas promedio de otros meses del año, por lo que el instituto considera la ciudad una “*zona de carácter isotermal*”. En el análisis de condiciones extremas, los meses diciembre, enero y febrero son los meses con las mayores variaciones, donde se alcanzan temperaturas altas durante el día (25°C) y bajas durante la noche (-6°C).

La precipitación media multianual de la ciudad es de 847mm con dos temporadas lluviosas entre abril-mayo y octubre-noviembre. La humedad relativa media anual varía entre 73% y 86%, siendo Guaymaral (al norte de la ciudad) uno de los sectores que presenta menor humedad ambiental, y Fontibón y la Hacienda Las Vegas (occidente) los lugares con mayor humedad. El brillo solar, definido como el número de horas que una superficie está expuesta directamente a la radiación solar, oscila entre 1300 – 1800 horas al año. Este valor está relacionado con la nubosidad que se presenta en diferentes sectores de la ciudad, siendo las estaciones climáticas cercanas a los cerros orientales las más afectadas. Los meses con mayor cantidad de horas de brillo solar son enero y diciembre, coincidiendo con las épocas de mayor temperatura y menor precipitación. Con respecto a los vientos reportados en la estación del Aeropuerto El Dorado, existe predominancia de los vientos del noreste (17.4%) con magnitudes promedios de 1.5m/s. Los meses con vientos más fuertes son Junio, Julio y Agosto. Las épocas de calma representan 22.3% de todo el año (IDEAM, 1999) .

Figura 3-1. Ubicación de zona de estudio y estaciones climáticas. En magenta las estaciones de Red de Monitoreo de la Secretaria de Ambiente (RDM), en azul estaciones de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y en naranja estaciones de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CARC).



#### Estaciones climáticas

A Puente Aranda	F Las Ferias	K Fontibon	P El Dorado Didactica
B Usaquen	G Guaymaral	L Apto Guaymaral	Q Venado de Oro
C Carvajal	H Kennedy	M Doña Juana	R UDCA
D Tunal	I Suba	N La Ramada	
E Centro Alto Rendimiento	J San Cristobal	O Las Vegas Hda	

#### Localidades

1 USAQUEN	5 USME	9 FONTIBON	13 TEUSAQUILLO	17 CANDELARIA
2 CHAPINERO	6 TUNJUELITO	10 ENGATIVA	14 LOS MARTIRES	18 RAFAEL URIBE URIBE
3 SANTA FE	7 BOSA	11 SUBA	15 ANTONIO NARIÑO	19 CIUDAD BOLIVAR
4 SAN CRISTOBAL	8 KENNEDY	12 BARRIOS UNIDOS	16 PUENTE ARANDA	20 SUMAPAZ



## 4. Metodología

La metodología se subdivide variación de la temperatura de la superficie entre las zonas urbanas y rurales, patrones temporales y espaciales de la temperatura horaria, e influencia de variables de entorno sobre la temperatura promedio diaria.

### 4.1 Variación de la temperatura de la superficie entre las zonas urbanas y rurales

La determinación de la magnitud y extensión de la isla de calor se hizo a través del análisis del cambio de la temperatura entre la urbe y las zonas rurales adyacentes. Dicho análisis incluye (1) selección del producto satelital de temperatura superficial, (2) delimitación de la zona urbana, (3) definición de la zona rural adyacente y (4) análisis estadístico de las temperaturas superficiales para las áreas urbanas y rural.

Con respecto a los datos satelitales existen diferentes fuentes de datos para la temperatura superficial (Jain et al., 2019; McCartney & Mehta, 2020; Tabla 4-1). En este estudio se seleccionó el producto MOD11A1 del sensor MODIS Terra, el cual consiste en registros diarios de temperatura superficial (LST, por sus siglas en inglés) para la hora de sobrevuelo del satélite sobre el sector (10:30am hora local) con una resolución espacial de 1 km. El producto MOD11A1 utiliza los valores de radiancia y reflectancia ofrecidos en las bandas 31 y 32, y aplica el algoritmo Temperature Emissivity Separation (TES) sobre celdas sin nubosidad. Este algoritmo utiliza la emisividad reportada por el satélite para extraer la temperatura superficial, haciendo correcciones atmosféricas como el contenido de vapor (Water Vapor Scaling, WVS), ofreciendo resultados con errores menores a 1° K en superficies como agua, vegetación o zonas desérticas (Wan, 2013).

Tabla 4-1. Consideraciones a tener en cuenta para el estudio de LST según satélites disponibles.

Satélite	Rango	Frecuencia	Resolución espacial
Landsat	1984 – Actual	14 días	30 m
MODIS Terra	2001 – Actual	Diario	1000 m
Sentinel	2016 – Actual	Diario	1000 m
SNPP - JPSS	2011 - Actual	12 horas	750 m

La selección de este producto se basó en su frecuencia diaria y en el nivel de procesamiento (i.e. corregido LST). Adicionalmente se consideró que su resolución espacial era suficiente para un análisis de macroescala.

Este análisis se realizó tomando las imágenes satelitales de uno de los primeros días cada año, para evitar pérdida de datos debido a la cobertura de nubes, desde 2002 hasta el 2020, disponibles en la plataforma Google Earth Engine. Las fechas exactas se encuentran en el Anexo A

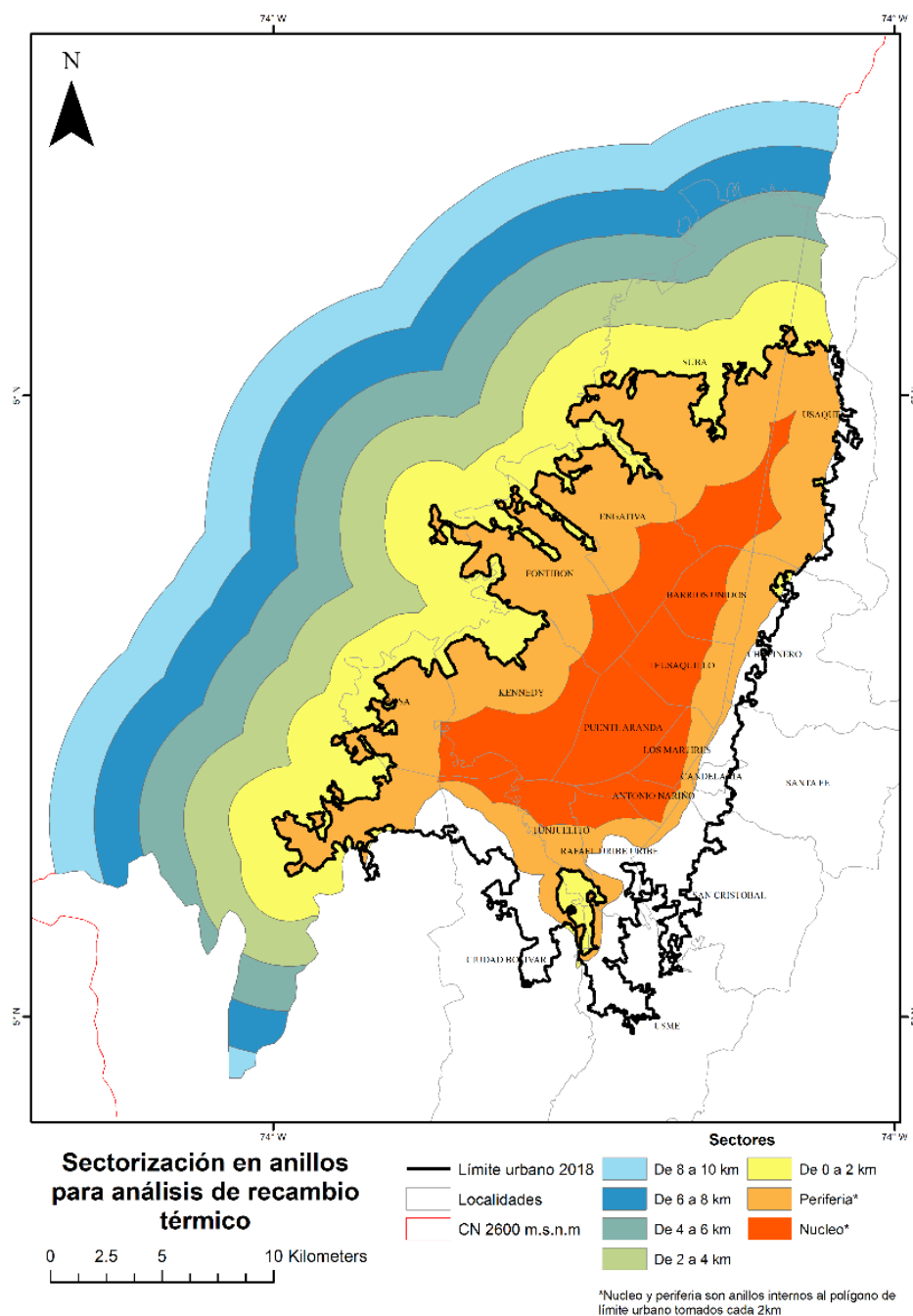
La delimitación de la zona urbana se realizó a través de una clasificación supervisada de imágenes Landsat de los años 2001, 2010 y 2018 (Anexo B). La clasificación supervisada implica la creación de valores de entrenamiento en todas las bandas del espectro visible e infrarrojo para las siguientes clases: urbano, agua, agricultura y bosques (o vegetación natural). Dentro de los resultados de esta clasificación se obtuvieron buenos indicadores para la clasificación de agua y urbano y errores comunes entre la diferenciación de bosques y zonas de agricultura. En las zonas más externas de la ciudad, donde el área construida disminuye de forma gradual, se aplicó un análisis focal con una ventana de 7x7 (210m x 210m) usando la moda de las muestras para reducir el ruido del borde.

El área rural adyacente se definió a partir de cada uno de los polígonos urbanos (para el rango de años entre 2002 a 2007 se utilizó el límite urbano del 2001, para 2007 a 2013 se usó el límite de 2010 y para 2014 hasta 2020 se tomó el límite de 2018), usando anillos o polígonos de influencia generados cada 2 kilómetros desde el límite urbano hasta una distancia máxima de 10 kilómetros. Adicionalmente, hacia el interior de la ciudad, también se generaron zonas de influencia cada 2 kilómetros desde el límite urbano (denominados periferia-urbana y núcleo-urbano).

Cabe resaltar que en la elaboración de estos sectores se descartaron las zonas cuya altura estuviese por encima de los 2600 m.s.n.m, ya que están ligados a un fuerte descenso en la temperatura asociado a los cerros orientales. La distribución de las zonas de influencia de las zonas de influencia para el año 2018 se presenta en la Figura 4-1. Posteriormente, se generaron graficas de densidad para cada anillo dentro de cada periodo, y se calculó el índice de disimilitud entre las gráficas de densidad de un mismo año para cuantificar el grado de traslape entre ellas. El índice de disimilitud varía entre 2 (no existe traslape) y 0 (traslape del 100%). Particularmente, para este estudio valores de índice de disimilitud

cercanos a 0 implican que no hay diferencia entre los dos anillos en análisis y valores cercanos a 2 implican que hay mucha diferencia entre ambos. Los análisis espaciales se realizaron en ArcGIS10.5 mientras que los análisis estadísticos se realizaron en Python 3.8.

Figura 4-1. Esquema de sectorización de anillos para análisis de variación de la temperatura superficial entre las zonas urbanas y rural.



## 4.2 Patrones temporales y espaciales de la temperatura horaria

Este análisis se realizó a partir de los registros históricos de estaciones climáticas disponibles en RDM. Se incluyeron incluye 11 estaciones, 9 en la ciudad y 2 en la periferia reportando datos desde el año 2008 hasta el 2019 (Tabla 4-2).

Tabla 4-2. Ubicación de estaciones de Red de Monitoreo usadas para análisis horario.

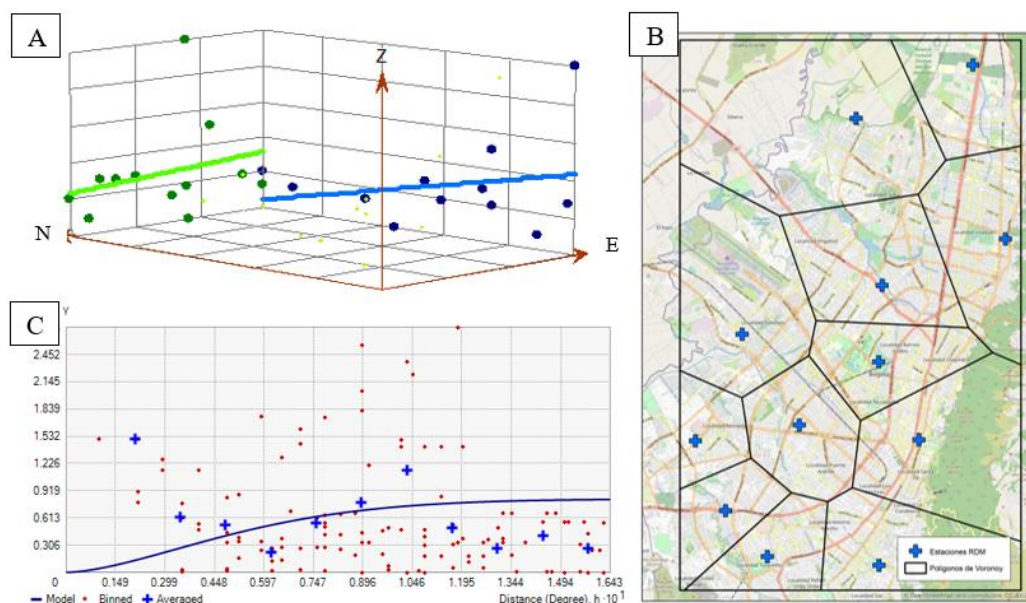
Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Tipo
Guaymaral	4.7838	-74.0442	2580	Rural
Usaquén	4.7104	-74.0304	2570	Urbana
Suba	4.7612	-74.0935	2571	Rural
Las Ferias	4.6907	-74.0825	2552	Urbana
Fontibón	4.6701	-74.1416	2591	Urbana
Puente Aranda	4.6318	-74.1175	2590	Urbana
Kennedy	4.6251	-74.1613	2580	Urbana
Carvajal	4.5956	-74.1486	2563	Urbana
Tunal	4.5762	-74.1310	2589	Urbana
San Cristóbal	4.5726	-74.0838	2688	Urbana
Centro de Alto Rendimiento	4.6568	-74.0839	2577	Urbana

Se utilizó el método de co-kriging para obtener superficies de temperatura horaria. El kriging es un método de geoestadística frecuentemente utilizado para variables climatológicas como temperatura y pluviosidad (Hsu, Mavrogianni, & Hamilton, 2017). Esta técnica presenta ventajas con respecto a otros métodos de interpolación ya que, además de evaluar la correlación entre las muestras como función de su distancia (i.e. correlograma), genera una medida de la incertidumbre asociada a las predicciones. El método de co-kriging permite establecer correlogramas o semivariogramas entre varias variables para estimar el valor de una de ellas. Se seleccionó esta técnica con el fin de incluir el efecto de la elevación sobre la temperatura.

Para la aplicación de kriging se deben revisar primero 2 condiciones: (1) las covariables no deben presentar tendencia espacial y en caso de tenerla debe ser removida al momento de calcular el semivariograma. (2) las muestras deben estar espacialmente bien distribuidas. En este caso estas condiciones fueron revisadas como se muestra en la Figura 4-2. Particularmente se encontró una tendencia lineal en la altura sobre el nivel del

mar, la cual incrementa hacia el suroriente (debido a los cerros orientales), por lo que debió tenerse en cuenta para el cálculo del semivariograma. Además, se escogió el modelo de semivariograma esférico, con un lag de 12 (asociado al número de estaciones). Finalmente se obtuvieron los RMS de cada una de las superficies generadas respecto a los valores medidos.

Figura 4-2. A. Análisis de tendencia de alturas sobre nivel del mar. B. Distribución de estaciones de RDM y sus polígonos de Voronoi. C. Semivariograma esférico para los datos de temperatura - altura a las 8am.



Adicionalmente, a partir de los datos de las estaciones RDM, se calculó el índice de intensidad de islas de calor (UHII), planteado por Henríquez & Romero (2019), como la diferencia entre las temperatura promedio entre las zonas rurales y las zonas urbanas, para estimar UHII horario y UHII mensual.

### 4.3 Influencia de variables de entorno sobre la temperatura promedio diaria

El efecto de la urbanización sobre la temperatura promedio mensual se realizó a partir de (1) los registros de temperatura reportados por las estaciones del IDEAM, CARC y RDM, (Anexo A) y (2) los índices normalizados de vegetación (NDVI) y de urbanización (NDBI), calculados a partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS para el periodo de 1998 – 2018, disponibles en la plataforma del Servicio Geológico de Estados

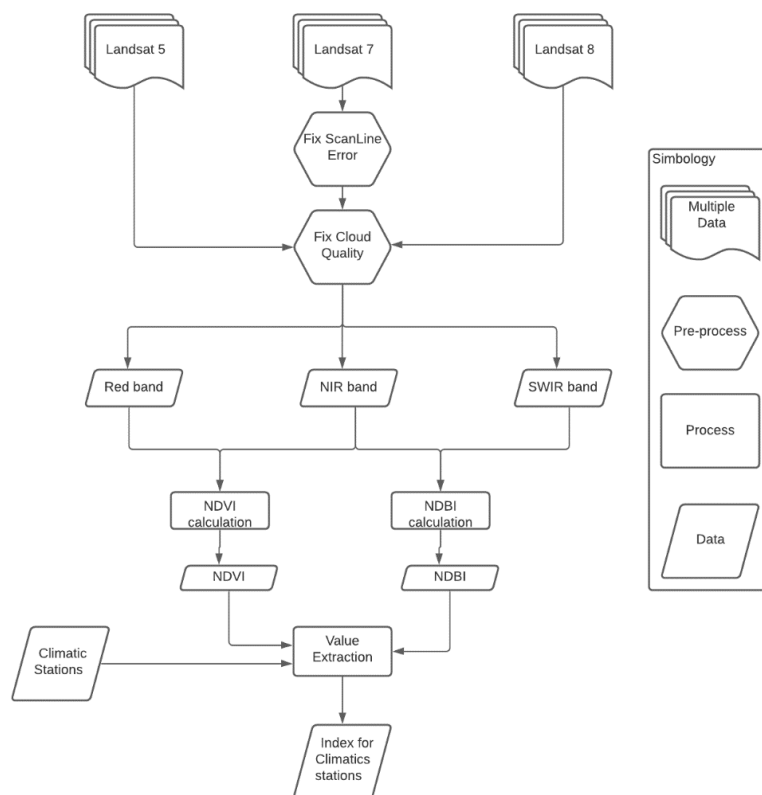
Unidos (USGS). Estos índices se usan para determinar la cobertura de la superficie y grado de urbanización. Específicamente, el NDVI se utilizó para determinar si las estaciones se encontraban sobre cobertura verde (valores mayores que 0.5), sobre suelo descubierto (valores menores que 0.2) o en un suelo mixto. El NDBI posee un rango entre -1 y 1, donde -1 son zonas menos urbanizadas y 1 zonas urbanizadas. Las imágenes se seleccionaron teniendo en cuenta el nivel de procesamiento (i.e. producto surface reflectance) y una baja cobertura de nubes. Como resultado se seleccionaron 29 imágenes cuya lista se encuentra disponible en el Anexo B. El procedimiento seguido para la obtención de estos índices sobre las ubicaciones de las estaciones se muestra en la tabla Tabla 4-1 y

Figura 4-3

Tabla 4-1. Índices obtenidos de imágenes Landsat. Fuente: USGS

Índice	Formula general	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI/TIRS
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$	$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$
Normalized Difference Building Index	$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$	$NDBI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	$NDBI = \frac{B6 - B5}{B6 + B5}$

Figura 4-3. Modelo cartográfico para el procesamiento de imágenes Landsat.



Posteriormente se generó un modelo de tipo aditivo como lo muestra la siguiente ecuación.

$$T(^{\circ}C) = (A \times Elevación) + (B \times NDBI) + (C \times Cobertura) + (D \times Ubicación) + E \text{ (Ec. 4.1)}$$

Donde la elevación está expresada en metros sobre nivel del mar (m.s.n.m), NDBI tiene un rango entre -1 y 1, y cobertura y ubicación son variables categóricas binarias (vegetado/no vegetado, rural/urbano respectivamente). A este modelo se le aplicó un método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés) para obtener los coeficientes A, B, C D y E y su significancia estadística. Los análisis se realizaron en Python 3.8.

## 5.Resultados

### 5.1 Variación de la temperatura de la superficie entre las zonas urbana y rural

Los datos de LST del sensor de MODIS muestran un calentamiento promedio del área urbana de  $0.5^{\circ}\text{C}$  entre las imágenes de enero de 2002 y enero de 2020, con un rango que oscila entre  $3.2^{\circ}\text{C}$  y  $-2.7^{\circ}\text{C}$  de diferencia. En la Figura 5-1 se muestran los años 2002, 2008, 2014 y 2020 donde permanentemente se mantienen valores más altos de temperatura superficial en localidades como Puente Aranda, Engativá y Kennedy. La condición de temperaturas más elevada se presentó la fecha 02/01/2010, con puntos calientes que superaban temperaturas de  $21.5^{\circ}\text{C}$  y extensión de  $4.73\text{ km}^2$  en la localidad Puente Aranda. Similarmente, la fecha que reportó temperaturas más bajas fue 4 de febrero del 2004, donde no se perciben efectos de la isla de calor sobre la zona rural tal como lo muestra la Figura 5-2.

Cabe resaltar que en el ejercicio de la clasificación supervisada donde se obtuvo el polígono urbano, el municipio de Soacha fue incorporado dentro del polígono urbano de Bogotá al no existir una zona rural entre la cabecera urbana de este municipio y Bogotá. Esta situación no se presenta para las cabeceras urbanas de los municipios de Mosquera y Madrid, por lo que quedaron fuera del polígono urbano. Sin embargo, las cabeceras de estos dos municipios presentan focos de calor sobre su superficie urbana, mostrando que incluso zonas urbanas pequeñas también presentan altas temperaturas respecto a las zonas rurales circundantes.

Las curvas de densidad para los años 2002, 2008, 2014 y 2020 se presentan en la Figura 5-3. En ellas se puede observar que la distribución de probabilidad del núcleo urbano presenta temperaturas más altas (con medianas por encima de  $20.18^{\circ}\text{C}$ ) respecto a las distribuciones de probabilidad de los otros sectores. Adicionalmente se puede observar que la curva de densidad de la periferia urbana tiene una distribución de temperaturas más amplia que puede ir desde  $15^{\circ}\text{C}$  hasta  $23^{\circ}\text{C}$  en las fechas más cálidas. Por su lado, las curvas que representan las zonas rurales tienen distribuciones más amplias que las de la periferia urbana, y se extienden desde  $\sim 9^{\circ}\text{C}$  hasta los  $\sim 22^{\circ}\text{C}$ , con medianas que oscilan



entre 18.5°C para el anillo más cercano a 13.5°C para el anillo más externo respecto al límite urbano (Figura 5-4).

Figura 5-1. Temperaturas superficiales obtenidas del satélite MODIS para los años 2002, 2008, 2014 y 2020. El límite está definido por imágenes Landsat del 2001, 2010 y 2018 respectivamente.

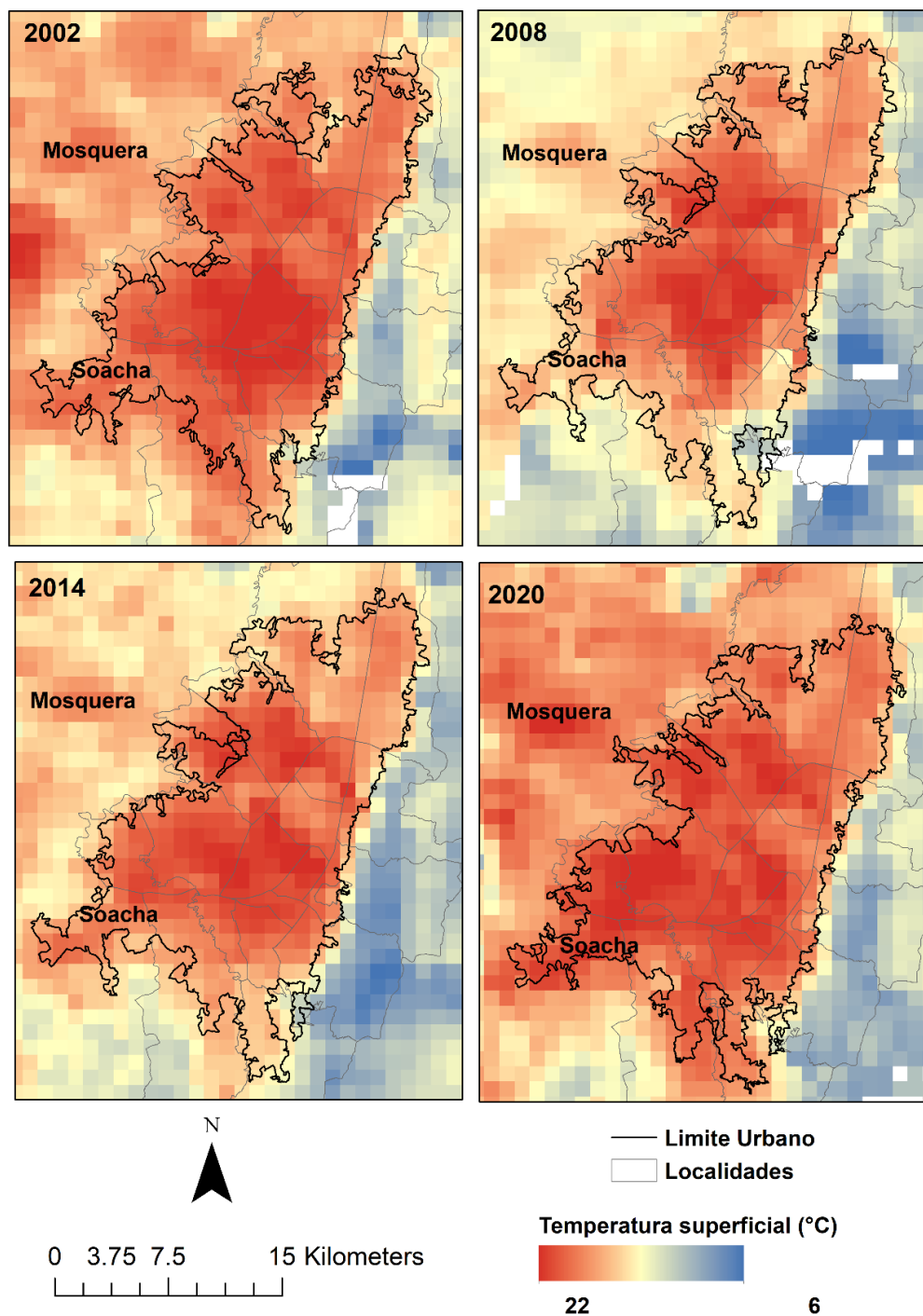


Figura 5-2. Distribución de temperaturas para las fechas con menor y mayor temperatura promedio respectivamente.

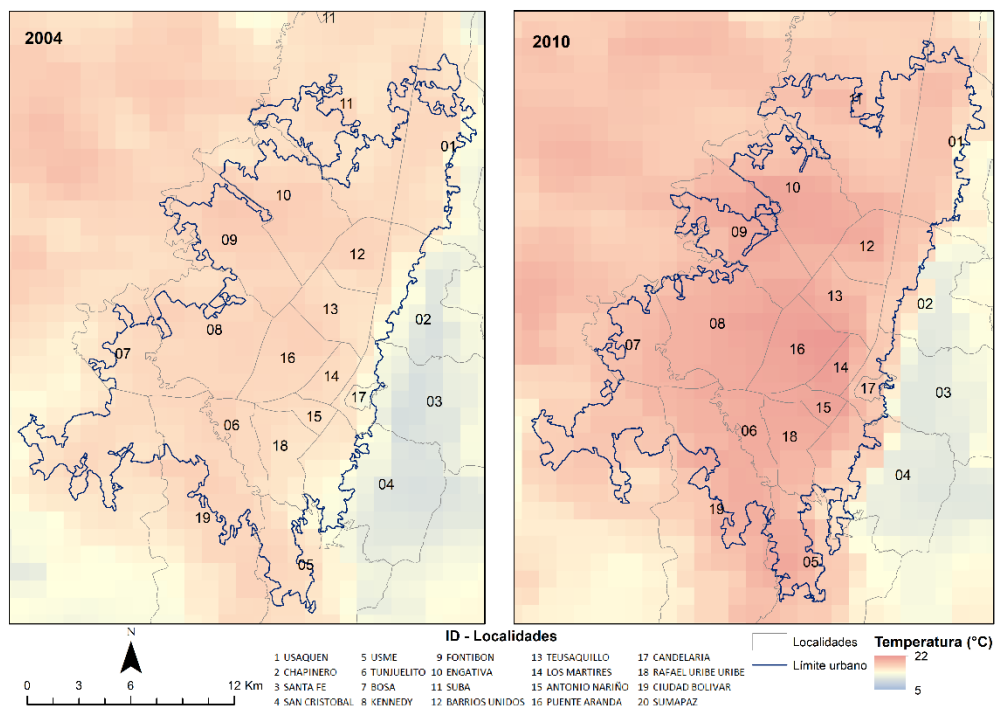
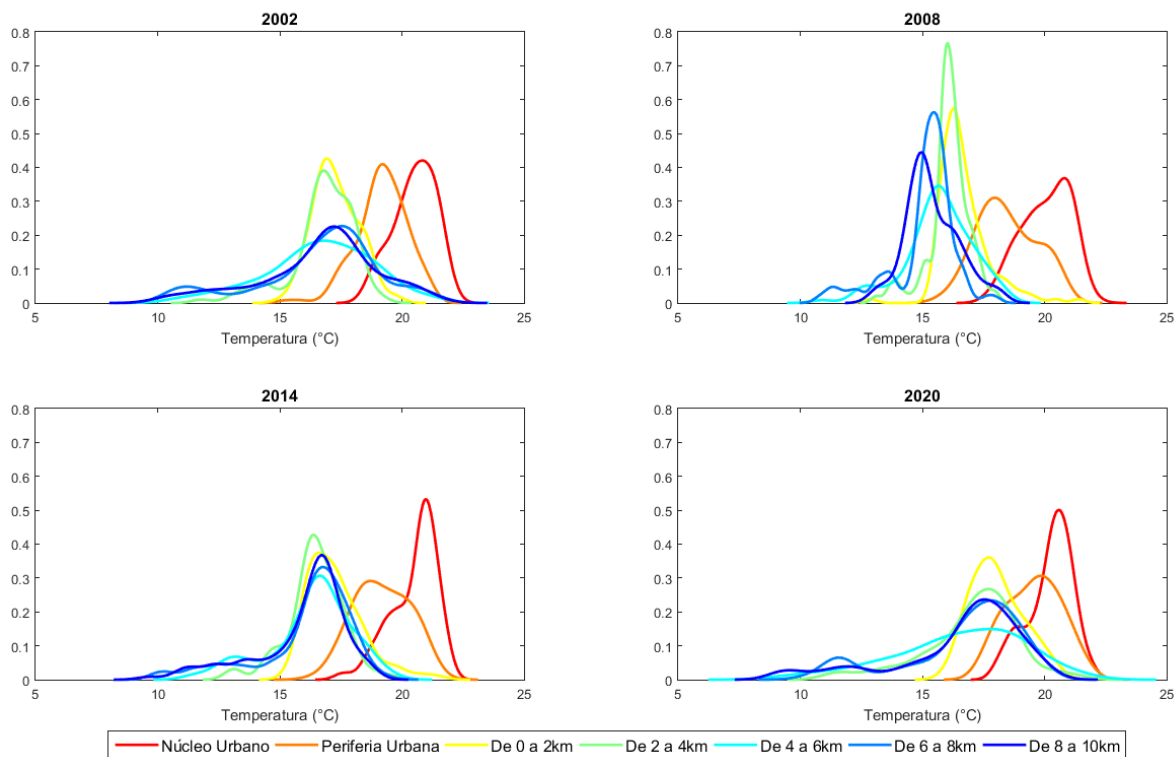


Figura 5-3. Graficas de densidad para las áreas de influencia o anillos para los años 2002, 2008, 2014 y 2020.



El análisis de índices de disimilitud (Figura 5-5) que relacionan los sectores de 2km hasta 10 km mantienen valores por debajo de 0.8, indicando que son curvas de densidad similares, tal como se puede observar en las gráficas de densidad (Figura 5-3). El índice de disimilitud entre los dos anillos del casco urbano El índice de disimilitud entre los dos anillos del casco urbano (núcleo y periferia urbana) tiene un valor promedio de 0.84 para todos los años. El valor más alto de disimilitud se presenta entre la periferia urbana y el primer anillo de la zona rural (2km), con un valor promedio de 1.09, indicando que aproximadamente el 50% de las curvas de densidad de estas dos zonas no se traslapan entre sí. Valores atípicos se presentan en la curva de disimilitud para la fecha de 2008, que no muestra el pico de disimilitud entre la zona rural y urbana, es decir que la zona de transición en esta fecha era mucho más amplia.

**Medianas**

Y-axis: Temperatura (°C) (13 to 22)

X-axis: Sectores (Núcleo Urbano, Periferia Urbana, 2km, 4km, 6km, 8km, 10km)

Legend: 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020

Annotations: 2004, 2005

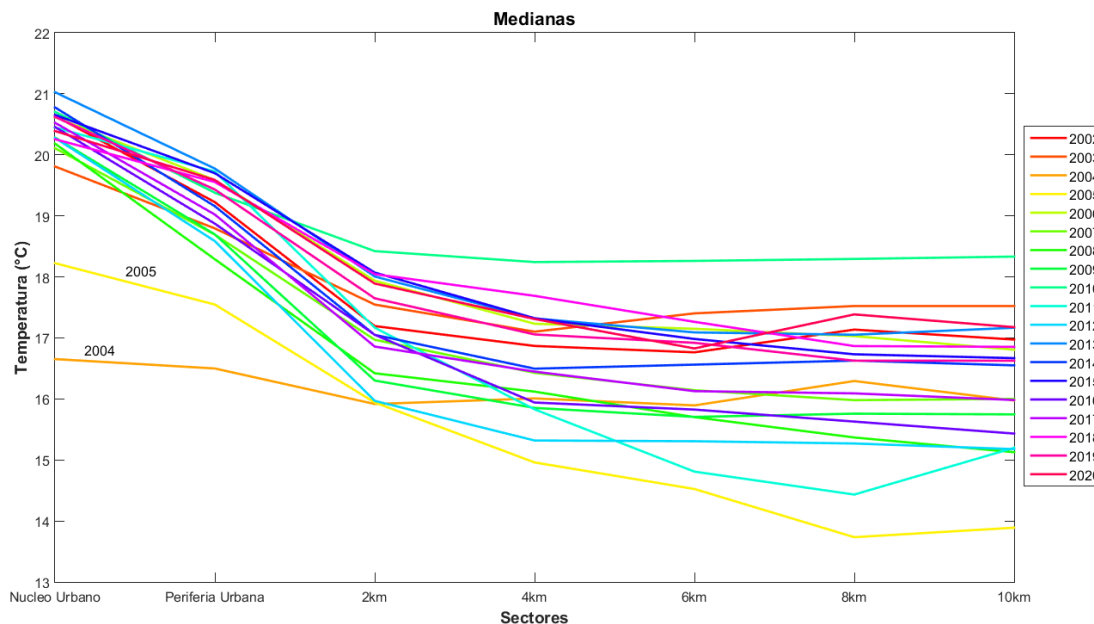
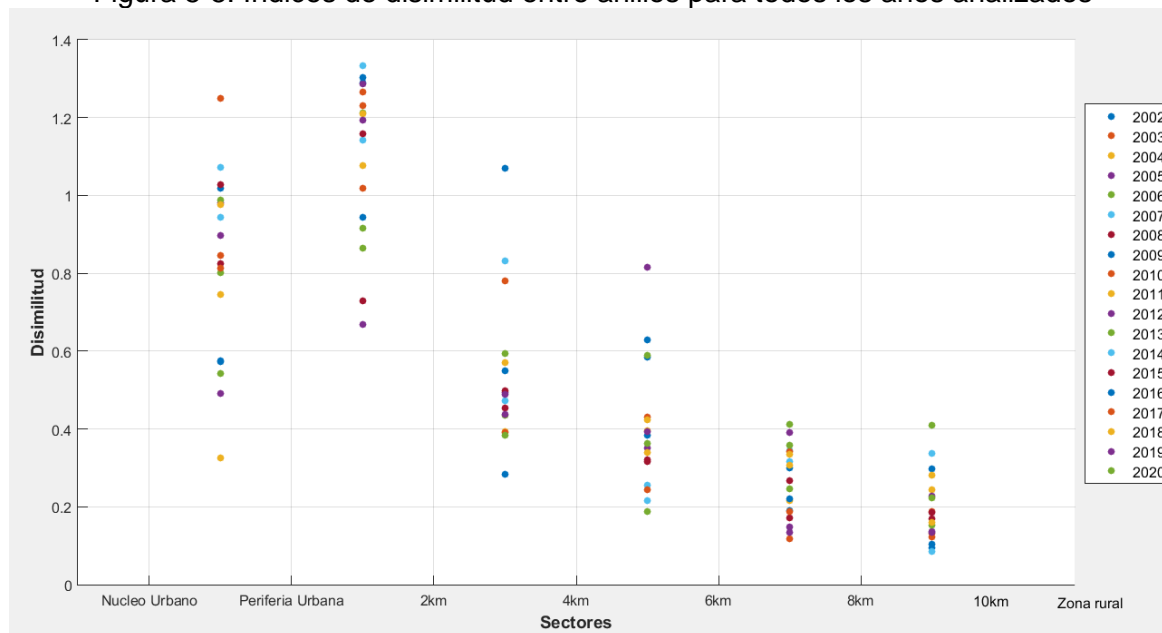
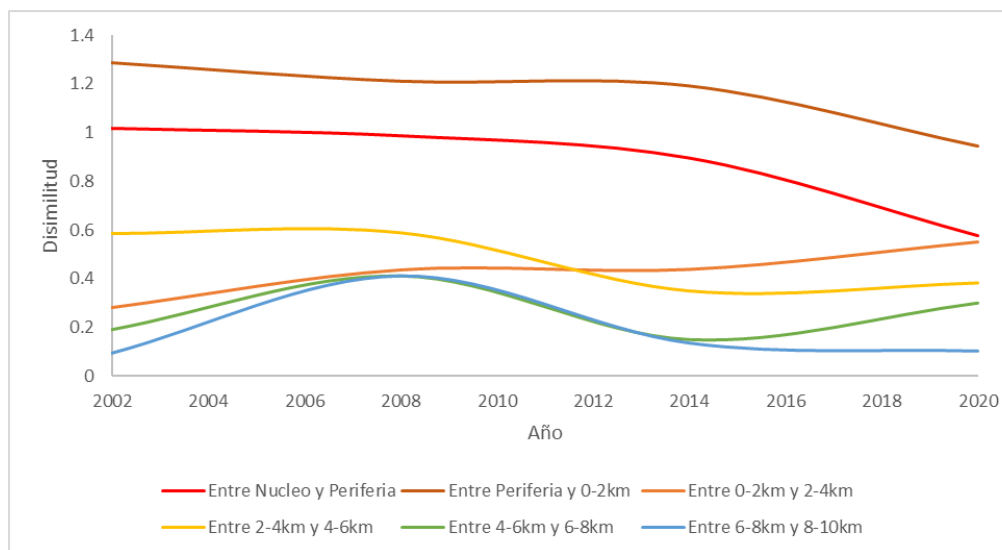


Figura 5-5. Índices de disimilitud entre anillos para todos los años analizados



Por último, la evolución temporal de los índices de disimilitud (Figura 5-6) entre el núcleo y la periferia urbana, al igual que entre la periferia urbana y el primer anillo rural muestra un descenso, indicando que la distribución de la temperatura entre estas zonas se ha vuelto más similar. La disimilitud para los primeros anillos rurales (0-2 y 2-4km) tiene una tendencia creciente, mientras que las de los anillos rurales más lejanos (2-4 a 8-10 km) parece mantenerse estable.

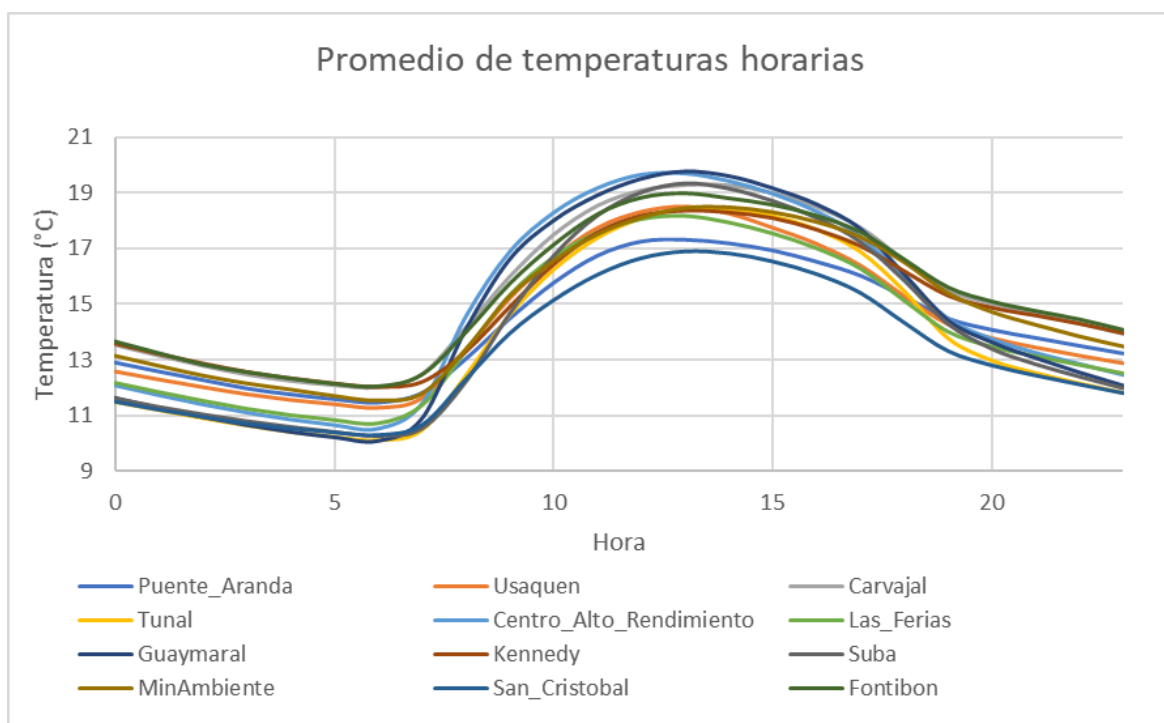
Figura 5-6. Evolución temporal de índice de disimilitud.



## 5.2 Patrones horarios de las estaciones climáticas

El comportamiento horario de las temperaturas atmosféricas (Figura 5-5), indica que los valores más altos se dan entre 12:00 y 13:00 para todas las estaciones mientras que las temperaturas más bajas ocurren antes del amanecer entre las 05:00 y 06:00. El rango de temperatura diaria oscila entre valores mínimos de ~10-12°C a valores máximos de ~17-20°C.

Figura 5-5. Comportamiento horario de temperatura en estaciones con registro horario.



Adicionalmente las estaciones ubicadas en zonas rurales (Guaymaral y Suba) presentan una mayor variación de temperatura a lo largo del día. Por otro lado, la estación que presenta la mayor temperatura promedio diaria es Carvajal, ubicada en el sur en una zona industrial de la ciudad (localidad Ciudad Bolívar), mientras que la estación con menor temperatura promedio es San Cristóbal ubicada al oriente (muy cercana a los cerros orientales, localidad San Cristóbal).

Respecto a la distribución espacial de la temperatura horaria, los resultados (Figura 5-7) muestran que en el transcurso del día se genera un punto caliente o hotspot en el centro de la ciudad (localidad de Barrios Unidos), y otros menos intensos en las horas de la tarde (12:00 – 16:00) en la zona industrial de Carvajal, Kennedy y Guaymaral. En la zona

industrial de Puente Aranda no se presenta foco de altas temperaturas y se mantiene relativamente estable durante el día. También se puede ver que en la periferia del área urbanizada se alcanzan cambios de temperaturas más altos que en la ciudad en general, pero durante la noche su temperatura decae considerablemente, acorde con los resultados de las estaciones Guaymaral y Suba. El error medio cuadrático (RMS) asociado a las superficies generadas varían entre 0.79 y 1.02 °C (Tabla 5-1)

Figura 5-7. Superficies de temperaturas horarias para la ciudad de Bogotá

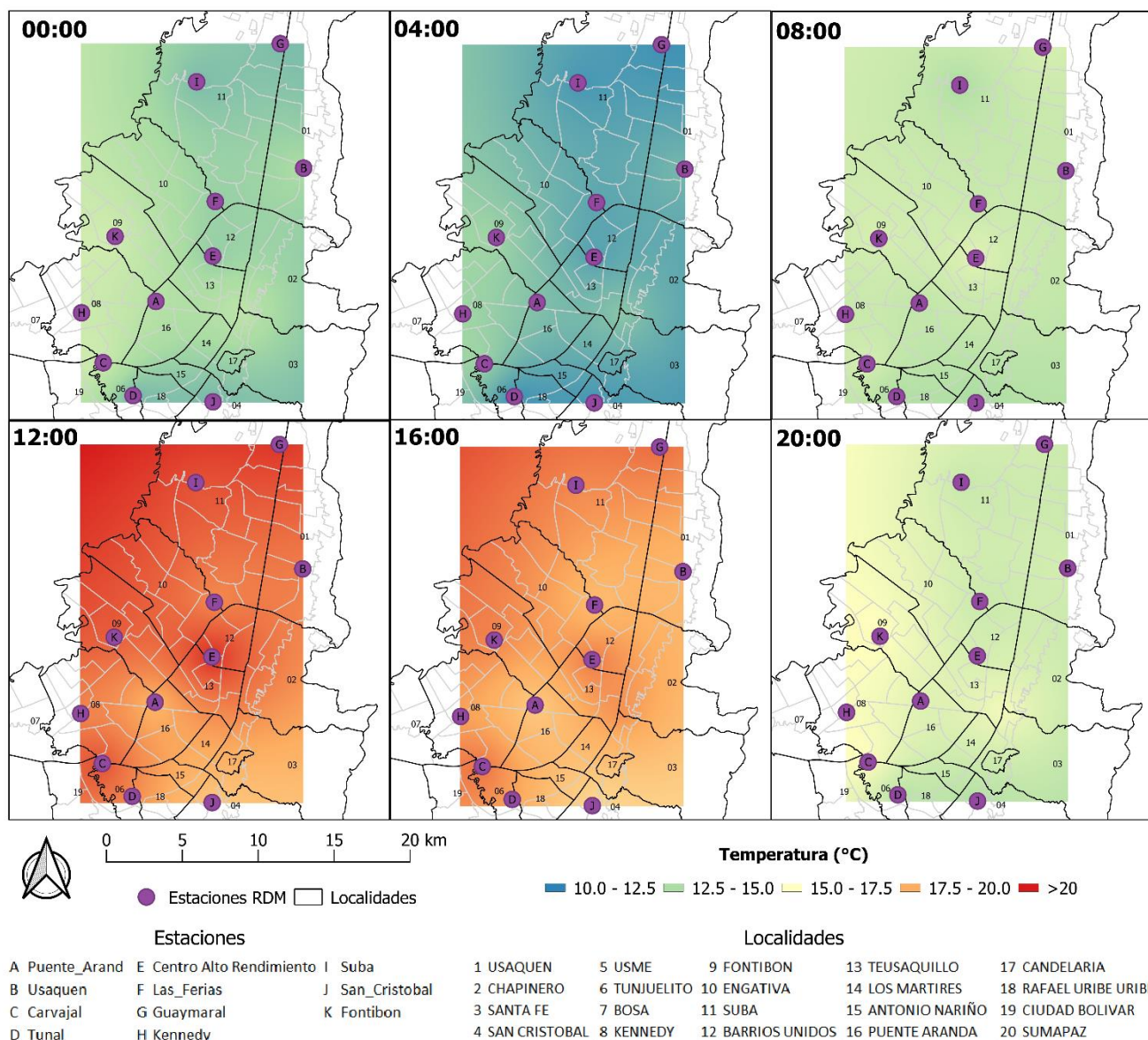




Tabla 5-1. RMS para las superficies horarias creadas a partir de co-kriging para la ciudad de Bogotá.

Hora	RMS (°C)	Hora	RMS(°C)	Hora	RMS(°C)	Hora	RMS(°C)
00:00	0.90	06:00	0.83	12:00	0.85	18:00	0.77
01:00	0.87	07:00	0.79	13:00	0.86	19:00	0.80
02:00	0.83	08:00	0.96	14:00	0.87	20:00	0.86
03:00	0.82	09:00	1.02	15:00	0.88	21:00	0.89
04:00	0.83	10:00	0.95	16:00	0.87	22:00	0.90
05:00	0.83	11:00	0.88	17:00	0.83	23:00	0.91

El índice UHII horario muestra que las horas con mayor diferencia de temperaturas rurales-urbanas se encuentran entre las 12:00 y las 16:00 y presenta un rango de UHII entre 0.51-1.64°C para todo el día. Mientras que los meses que reportaron intensidades más altas fueron enero y febrero con un rango entre 0.83-1.33°C para todo el año.

Tabla 5-2. UHII promedios horarios para la ciudad de Bogotá.

Hora	UHII (°C)	Hora	UHII (°C)	Hora	UHII (°C)	Hora	UHII(°C)
<b>0:00</b>	0.93	<b>06:00</b>	1.04	<b>12:00</b>	1.43	<b>18:00</b>	0.86
<b>1:00</b>	0.96	<b>07:00</b>	1.03	<b>13:00</b>	1.64	<b>19:00</b>	0.51
<b>2:00</b>	0.96	<b>08:00</b>	0.81	<b>14:00</b>	1.58	<b>20:00</b>	0.51
<b>3:00</b>	0.97	<b>09:00</b>	0.86	<b>15:00</b>	1.51	<b>21:00</b>	0.64
<b>4:00</b>	0.98	<b>10:00</b>	1.02	<b>16:00</b>	1.43	<b>22:00</b>	0.77
<b>5:00</b>	1.01	<b>11:00</b>	1.22	<b>17:00</b>	1.24	<b>23:00</b>	0.87

Tabla 5-3. UHII promedios mensuales para la ciudad de Bogotá.

Mes	UHII (°C)	Mes	UHII (°C)	Mes	UHII (°C)
<b>Enero</b>	1.33	<b>Mayo</b>	0.89	<b>Septiembre</b>	0.95
<b>Febrero</b>	1.27	<b>Junio</b>	0.83	<b>Octubre</b>	1.07
<b>Marzo</b>	1.04	<b>Julio</b>	0.83	<b>Noviembre</b>	1.08
<b>Abril</b>	0.93	<b>Agosto</b>	0.93	<b>Diciembre</b>	1.24

### 5.3 Influencia de variables de entorno sobre la temperatura promedio diaria

Los resultados del modelo tipo aditivo indican coeficientes estadísticamente significativos para las variables de elevación y ubicación ( $p < 0.05$ ), mientras que los coeficientes de las variables cobertura y NDBI no son significativos. El coeficiente de la variable elevación indica que por cada 100 metros de incremento en la elevación la temperatura disminuye 0.36°C. Para la variable ubicación, el coeficiente indica que sólo por el hecho de

encontrarse dentro de la ciudad la temperatura 0.72°C más alta que en las estaciones rurales.

Tabla 5-4. Coeficientes y respectiva significancia en ajuste de mínimos cuadrados ordinarios.

Coeficiente	Variable	Valor	Desviación Estándar	t	p> t
A	Elevación	-0.0036	0.001	-4.112	~0
B	NDBI	-0.236	0.731	-0.323	0.747
C	Cobertura	0.1841	0.278	0.661	0.509
D	Ubicación	0.7258	0.194	3.741	~0
E	Intercepto	22.7859	2.292	9.942	~0



## 6. Discusión

Los resultados de este trabajo muestran que existe una diferencia geográfica entre los puntos calientes de la isla de calor superficial y la isla de calor atmosférica. La primera de ellas reporta, para la mayoría de los años analizados, puntos calientes en la localidad de Puente Aranda, mientras que el punto caliente para la isla de calor atmosférica está ubicado en el sector de Barrios Unidos. Además, las temperaturas superficiales alcanzan valores más altos de temperatura (hasta  $\sim 23^{\circ}\text{C}$ ) que las temperaturas atmosféricas ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ).

La isla de calor superficial, por su comportamiento respecto al límite urbano, tiene una transición gradual entre los 0 y 2 kilómetros respecto a este mismo límite, pasando de  $19^{\circ}\text{C}$  en la periferia urbana a  $\sim 17.2^{\circ}\text{C}$  en el primer anillo rural.

La disimilitud también indica valores máximos entre la zona de la periferia urbana hasta 2km del límite urbano, asociados a la zona de transición térmica que ocurre en este sector. Adicionalmente con el paso del tiempo, se puede notar que esta zona de transición aumenta su tamaño, tal como lo indica el aumento de disimilitud de los anillos más externos, al igual que la isla de calor aumenta de magnitud si los anillos del interior de la ciudad disminuyen su disimilitud, es decir se presentan temperaturas altas de manera uniforme en las zonas de casco urbano.

Los valores de UHI obtenidos en este análisis ( $\sim 1^{\circ}\text{C}$ ) difieren de los obtenidos en el estudio de Ramirez & Dominguez (2010). Esta diferencia puede explicarse por el hecho de que entre las estaciones analizadas por Ramirez y Dominguez se encuentran algunas ubicadas en zonas rurales más lejanas que 10 km y además de otras ubicadas sobre los cerros orientales, donde se ha notado poca influencia de la isla de calor de la ciudad. Como resultado las diferencias entre las temperaturas rurales y urbanas es mayor para Ramirez y Dominguez (2010).

Por otro lado, comparando los resultados con los obtenidos para otras ciudades de Latinoamérica (Henríquez & Romero, 2019), podemos observar que Bogotá guarda similitudes en el comportamiento horario con ciudades como Belo Horizonte y Sao Paulo, ya que la intensidad de la isla de calor alcanza su máximo en horas de la tarde.

Este último comportamiento parece acorde a climas tropicales (o dentro del trópico) donde la variabilidad intra-anual se expresa en las temporadas secas y húmedas.

En tanto a las variables de entorno que influyen en las temperaturas atmosféricas promedio diarias, sólo resultaron estadísticamente significativas la elevación y la ubicación respecto a la urbe. Como resultado, los índices NDVI y NDBI no parecen tener correlación con las temperaturas reportadas. Una posible explicación para este fenómeno es que estos índices representan una celda de 30mx30m, mientras que las mediciones de las estaciones son un reporte local de temperatura. Además, el índice NDBI no parece estar relacionado con el nivel de urbanización (por ejemplo, concentración o altura de edificaciones) y sólo reporta lugares donde se encuentran coberturas permeables e impermeables.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

De todos los análisis realizados, a diferentes escalas espaciales y temporales, midiendo tanto la isla de calor superficial como la isla de calor atmosférica, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La transición de temperaturas entre las zonas rurales y urbanas ocurre de manera gradual generando influencia en la temperatura de las zonas rurales hasta 2km de distancias respecto al límite urbano.
- La diferencia de las islas de calor entre las zonas rurales y la urbanización se encuentra alrededor de 1°C en promedio, registrando máximos a las 13:00 en los meses de enero y febrero, época predominantemente seca en la ciudad. Este valor está acorde con el modelo lineal, que establece que sólo por encontrarse en la ciudad, las estaciones climáticas reportan 0.7°C de temperatura atmosférica por encima de las estaciones rurales. Este modelo lineal también establece que el aumento en 100m de elevación implica una disminución de 0.3°C.
- Las temperaturas superficiales entre el núcleo urbano, la periferia urbana y el anillo rural más cercano se han hecho más similares entre sí a través del tiempo, implicando un crecimiento de la isla de calor urbana en los últimos 20 años.

### 7.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de islas de calor atmosférica de la misma forma en cómo se realizó con las islas de calor superficiales, es decir analizar hasta donde se tiene influencia la temperatura citadina en las zonas rurales. Una limitación para este tipo de análisis es la baja cobertura de estaciones climáticas reportando temperaturas horarias sobre todo hacia el sur de la ciudad y en las zonas rurales. En el futuro, y con la implementación de series de tiempo más largas y robustas, se pueden obtener análisis de las tendencias en el tiempo y el espacio de este tipo de isla de calor.

También se recomienda hacer un análisis teniendo en cuenta la zona urbana y las elevaciones por encima de 2600 m.s.n.m, para observar hasta donde se extiende la isla de calor superficial hacia la zona oriental de la ciudad. Para esto se debería tener en cuenta el uso de imágenes satelitales con resoluciones espaciales más finas, ya que se espera

que la zona de transición sea más pequeña que 1km (resolución de MODIS Terra) o incluso hacer mediciones locales de LST como Shandas (2018). Mediciones con satélites de mayor resolución permitirá establecer si los 2 kilómetros de influencia de la isla de calor se distribuyen uniformemente sobre la zona rural o hay zonas rurales más expuestas a la isla de calor urbano.

Adicionalmente se recomienda que en un siguiente análisis debería implementarse LST promedios mensuales, ya que el uso de LST diarios puede incluir ruido que no represente el comportamiento anual o mensual que se desea estudiar.

## A. Anexo: Bases de datos de estaciones climáticas

Estaciones tenidas en cuenta para estimación de comportamiento horario y calculo de UHII

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Tipo
Guaymaral	4.7838	-74.0442	2580	Rural
Usaquén	4.7104	-74.0304	2570	Urbana
Suba	4.7612	-74.0935	2571	Rural
Las Ferias	4.6907	-74.0825	2552	Urbana
Fontibón	4.6701	-74.1416	2591	Urbana
Puente Aranda	4.6318	-74.1175	2590	Urbana
Kennedy	4.6251	-74.1613	2580	Urbana
Carvajal	4.5956	-74.1486	2563	Urbana
Tunal	4.5762	-74.1310	2589	Urbana
San Cristóbal	4.5726	-74.0838	2688	Urbana
Centro de Alto Rendimiento	4.6568	-74.0839	2577	Urbana

Estaciones tenidas en cuenta para ajuste de mínimos cuadrados ordinarios

Nombre	Código Institucional	Instituto	Latitud	Longitud
Apto_Guaymaral	2120559	CARC	4.8166667	-74.08333
Doña_Juana	2120630	CARC	4.5	-74.16667
La_Ramada	21205160	CARC	4.7031944	-74.17719
SAN_JORGE_GRANJA	21205720	IDEAM	4.50575	-74.18928
ELDORADO_CATAM	21205791	IDEAM	4.7055833	-74.15067
VENADO_ORO	21205580	IDEAM	4.5983611	-74.06156
UDCA	21206260	IDEAM	4.7986389	-74.04972
Suba	3	RDM	4.7612472	-74.09346
Las Ferias	4	RDM	4.6907	-74.08248
Puente Aranda	6	RDM	4.6317667	-74.11748

## B. Anexo: Bases de datos de imágenes satelitales

Imágenes satelitales Landsat 7 y 8 tenidas en cuenta para extracción de polígono urbano

Satélite	Fecha	Nombre archivo
Landsat 7	25/02/2002	LE07_L1TP_008057_20020225_20170131_01_T1
Landsat 7	30/01/2010	LE07_L1TP_008057_20100130_20161217_01_T1
Landsat 8	04/01/2018	LE07_L1TP_008057_20180104_20180130_01_T1

Imágenes satelitales Landsat 7 y 8 tenidas en cuenta para la extracción de NDVI y NDBI para las estaciones climáticas

Satélite	Fecha	Nombre archivo
Landsat 5	05/01/1998	LT05_L1TP_008057_19980105_20161228_01_T1
Landsat 5	22/02/1998	LT05_L1TP_008057_19980222_20161225_01_T1
Landsat 5	23/12/1998	LT05_L1TP_008057_19981223_20161220_01_T1
Landsat 5	29/01/2001	LT05_L1TP_008057_20010129_20161212_01_T1
Landsat 5	14/02/2001	LT05_L1TP_008057_20010214_20161212_01_T1
Landsat 7	25/02/2002	LE07_L1TP_008057_20020225_20170131_01_T1
Landsat 7	11/01/2003	LE07_L1TP_008057_20030111_20170126_01_T1
Landsat 7	30/01/2004	LE07_L1TP_008057_20040130_20170122_01_T1
Landsat 7	15/02/2004	LE07_L1TP_008057_20040215_20170122_01_T1
Landsat 7	16/01/2005	LE07_L1TP_008057_20050116_20170116_01_T1
Landsat 7	19/01/2006	LE07_L1TP_008057_20060119_20170111_01_T1
Landsat 7	23/02/2007	LE07_L1TP_008057_20070223_20170104_01_T1
Landsat 7	29/12/2009	LE07_L1TP_008057_20091229_20161216_01_T1
Landsat 7	30/01/2010	LE07_L1TP_008057_20100130_20161217_01_T1
Landsat 7	17/01/2011	LE07_L1TP_008057_20110117_20161211_01_T1
Landsat 7	21/02/2012	LE07_L1TP_008057_20120221_20161202_01_T1
Landsat 7	21/12/2012	LE07_L1TP_008057_20121221_20190516_01_T1
Landsat 7	07/02/2013	LE07_L1TP_008057_20130207_20161127_01_T1

Satélite	Fecha	Nombre archivo
Landsat 8	01/01/2014	LC08_L1TP_008057_20140101_20170427_01_T1
Landsat 8	02/02/2014	LC08_L1TP_008057_20140202_20170426_01_T1
Landsat 8	19/12/2014	LC08_L1TP_008057_20141219_20170416_01_T1
Landsat 8	04/01/2015	LC08_L1TP_008057_20150104_20170415_01_T1
Landsat 8	21/02/2015	LC08_L1TP_008057_20150221_20170412_01_T1
Landsat 8	22/12/2015	LC08_L1TP_008057_20151222_20170331_01_T1
Landsat 8	23/01/2016	LC08_L1TP_008057_20160123_20170405_01_T1
Landsat 7	02/02/2017	LE07_L1TP_008057_20170202_20170228_01_T1
Landsat 7	19/12/2017	LE07_L1TP_008057_20171219_20180114_01_T1
Landsat 7	04/01/2018	LE07_L1TP_008057_20180104_20180130_01_T1
Landsat 8	30/12/2018	LC08_L1TP_008057_20181230_20190130_01_T1

Fechas de imágenes satelitales MODIS Terra (MOD11A1) tenidas en cuenta para la obtención de LST desde 2002 hasta 2020.

Año	Fecha (dd/mm/aa)	Año	Fecha
2002	01/01/2002	2012	01/01/2012
2003	04/01/2003	2013	01/01/2013
2004	04/02/2004	2014	02/01/2014
2005	26/12/2004	2015	01/01/2015
2006	01/01/2006	2016	03/01/2016
2007	03/01/2007	2017	03/01/2017
2008	04/01/2008	2018	04/01/2018
2009	28/12/2008	2019	02/01/2019
2010	01/01/2010	2020	02/01/2020
2011	05/01/2011		





## Bibliografía

- Algretawee, H., Rayburg, S., & Neave, M. (2019). Estimating the effect of park proximity to the central of Melbourne city on Urban Heat Island (UHI) relative to Land Surface Temperature (LST). *Ecological Engineering*, 138(August), 374–390. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.034>
- Bogotá Cómo Vamos. (2020). Informe de Calidad de Vida 2020, 227. Retrieved from <http://www.bogotacomovamos.org/documentos/informe-de-calidad-de-vida-2014-3/>
- Carpio, M., González, Á., González, M., & Verichev, K. (2020). Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. *Energy and Buildings*, 226, 110379. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110379>
- Chetia, S., Saikia, A., Basumatary, M., & Sahariah, D. (2020). When the heat is on: urbanization and land surface temperature in Guwahati, India. *Acta Geophysica*, 68(3), 891–901. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00422-3>
- EPA. (2008). Urban Heat Island Basics. In *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079546>
- Farina, A. (2012). Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain. *LUMA-GIS Thesis Nr*, (15), 50.
- Feng, Y., Gao, C., Tong, X., Chen, S., Lei, Z., & Wang, J. (2019). Spatial patterns of land surface temperature and their influencing factors: A case study in Suzhou, China. *Remote Sensing*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020182>
- Firozjaei, M. K., Weng, Q., Zhao, C., Kiavarz, M., Lu, L., & Alavipanah, S. K. (2020). Surface anthropogenic heat islands in six megacities: An assessment based on a triple-source surface energy balance model. *Remote Sensing of Environment*, 242(March), 111751. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111751>
- Gaur, A., Eichenbaum, M. K., & Simonovic, S. P. (2018). Analysis and modelling

- of surface Urban Heat Island in 20 Canadian cities under climate and land-cover change. *Journal of Environmental Management*, 206, 145–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.002>
- Gómez, Lady, & Castañeda, C. (2013). Estudio del Crecimiento Urbano con respecto al Efecto Isla de Calor para establecer Lineamientos de Gestión Energético Ambiental en Bogotá. In *Eleventh Latin American and Caribbean for Engineering and Technology* (pp. 1–10).
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296–305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Henríquez, C., & Romero, H. (2019). *Urban climates in Latin America. Urban Climates in Latin America*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4>
- Hsieh, C. M., & Huang, H. C. (2016). Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57, 130–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.005>
- Hsu, S., Mavrogianni, A., & Hamilton, I. (2017). Comparing Spatial Interpolation Techniques of Local Urban Temperature for Heat-related Health Risk Estimation in a Subtropical City. *Procedia Engineering*, 198(September 2016), 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.091>
- Instituto de Hidrología meteorología y estudios ambientales - IDEAM. (1999). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca alta del Río Tunjuelo. *IDEAM Instituto de Hidrologia Meteorologia y Estudios Ambientales*, 19–21.
- Jain, S., Sannigrahi, S., Sen, S., Bhatt, S., Chakraborti, S., & Rahmat, S. (2019). Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fast-growing urban area. *Journal of Urban Management*, 9(1), 54–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.09.004>
- Mccartney, S., & Mehta, A. (2020). Satellite Remote Sensing for Urban Heat Islands. In *National Aeronautics and Space Administration Satellite Remote*

*Sensing for Urban Heat Islands.*

- McPherson, E. G. (1990). Cooling Urban Heat Islands with Sustainable Landscapes. *The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*, 151–171. Retrieved from [http://gis.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/products/cufr\\_82\\_EM94\\_59.PDF](http://gis.fs.fed.us/psw/programs/uesd/uep/products/cufr_82_EM94_59.PDF)
- Memon, R. A., Leung, D. Y. C., & Chunho, L. I. U. (2008). Review of Generation, Determination, Mitigation UHI, *20*, 120–128.
- Moreno, A. J., Perdomo, C. A., & Avilés, O. (2018). Study of Climate Change in Bogota , using Colombia and Global Temperature Data. *International Journal of Applied Engineering Research*, *13*(13), 11225–11230.
- Neila, J. (2000). Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible: buenas prácticas edificatorias. *Cuadernos de Investigación Urbanística.*, *41*(6), 89–99.
- Ogashawara, I., & Bastos, V. (2012). A Quantitative Approach for Analyzing the Relationship between Urban Heat Islands and Land Cover. *Remote Sensing*, *4*(11), 3596–3618. <https://doi.org/10.3390/rs4113596>
- Pabón, J. D., Pulido, S. I., Jaramillo, O., & Chaparro, J. A. (1998). Calor En La Sabana De Bogotá. *Cuadernos de Geografía*, *VII*(1–2), 7.
- Pasetto, M., Pasquini, E., Giacomello, G., & Baliello, A. (2019). Innovative pavement surfaces as urban heat islands mitigation strategy: chromatic, thermal and mechanical characterisation of clear/coloured mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(sup1), S533–S555. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593230>
- Ramirez, A., & Dominguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá, (May 2014).
- Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A., & Comby, J. (2019). Evaluation of the effect of urban redevelopment on surface urban heat islands. *Remote Sensing*, *11*(3), 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs11030299>
- Shandas, V., Voelkel, J., Williams, J., & Hoffman, J. (2019). Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat.

- Climate*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/cli7010005>
- Voogt, J. (2009). How Researchers Measure Urban Heat Islands. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5463, 236–240.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-00887-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00887-0_19)
- Wan, Z. (2013). MODIS Land Surface Temperature Products Users Guide. *ERI*, 6(3).
- Wang, J., Zhou, W., & Wang, J. (2019). Time-series analysis reveals intensified urban heat island effects but without significant urban warming. *Remote Sensing*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/rs11192229>
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Niu, Z., Liu, F., & Wang, Q. (2017). Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 609, 742–754.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.217>